

# **Estudo de Comunicação Sem Fio para Grandes Distâncias: Limitações de HF/VHF e Proposição de Enlace Satelital GEO**

**Bruno M. Kuvasney<sup>1</sup>, Adinan Alves de Brito Filho<sup>1</sup>, Vitor Marques Rodrigues<sup>1</sup>,  
Fernando Hsiao<sup>1</sup>, Marcos Vinicius Mira<sup>1</sup>, Gustavo Diogo Silva<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal do ABC (UFABC)  
Santo André – SP – Brasil

b.kuvasney, adinan.brito, vitor.marques @aluno.ufabc.edu.br,

f.hsiao, marcos.mira, gustavo.diogo @aluno.ufabc.edu.br

**Abstract.** This work evaluates wireless communication alternatives to connect two organizations separated by 40,000 km. High Frequency (HF) and Very High Frequency (VHF) technologies are first examined and shown to be unfeasible due to propagation and distance limitations. As an alternative, a geostationary satellite (GEO) link is proposed. Mathematical modeling and numerical experiments demonstrate that the GEO link meets the requirements for delay, throughput, SNR,  $E_b/N_0$ , and BER, maintaining robust performance even under additional channel losses. The results indicate that the GEO solution is the most viable option for the scenario considered.

**Resumo.** Este trabalho avalia soluções de comunicação sem fio para interligar duas organizações separadas por 40 000 km. Inicialmente, analisam-se as tecnologias HF e VHF, demonstrando-se teoricamente sua inviabilidade devido a limitações de propagação e alcance. Como alternativa, propõe-se um enlace via satélite geoestacionário (GEO). A modelagem matemática e os experimentos realizados mostram que o enlace GEO atende aos requisitos de retardo, taxa de transmissão, SNR,  $E_b/N_0$  e BER, mantendo desempenho robusto mesmo sob perdas adicionais. Conclui-se que a solução GEO é a mais viável para o cenário estudado. O repositório público com o código do experimento computacional desenvolvido está disponível em <https://github.com/Vtr97/ProjetoRedesSemFio>.

## **1. Introdução**

A comunicação sem fio desempenha papel fundamental na interligação de sistemas distribuídos em grandes distâncias, sendo amplamente utilizada em aplicações que vão desde serviços críticos de voz até transmissão de dados e vídeo em alta capacidade. Entretanto, a escolha adequada da tecnologia de comunicação depende diretamente das características físicas do meio, da faixa de frequências utilizada e das limitações impostas pela propagação eletromagnética. Em cenários extremos, como a interligação de duas organizações separadas por aproximadamente 40 000 km, essas limitações se tornam particularmente relevantes.

No contexto deste trabalho, o desafio proposto consiste em avaliar a viabilidade de dois sistemas tradicionais de comunicação sem fio — HF (3–30 MHz) e VHF (30–300 MHz) — para a implementação de um enlace nessa escala de distância. Ambas

as tecnologias são amplamente empregadas em aplicações terrestres e marítimas, mas apresentam restrições de alcance decorrentes de seus mecanismos de propagação: enquanto o VHF depende majoritariamente de visada direta, o HF utiliza reflexões ionosféricas sujeitas a forte variabilidade temporal e limites físicos de múltiplos saltos. Assim, uma análise inicial baseada na geometria da Terra, na física da propagação e em estudos relacionados revela que nenhuma dessas tecnologias é capaz de atender, de forma prática ou confiável, à distância especificada.

Diante da inviabilidade das soluções HF e VHF para o cenário em estudo, torna-se necessária a proposição e avaliação de uma terceira alternativa. Para este fim, o presente trabalho investiga o uso de enlaces via satélites geoestacionários (GEO), cuja posição orbital permite cobrir cerca de um terço do globo e estabelecer enlaces ponto-a-ponto de grande extensão. Sistemas GEO são amplamente utilizados em aplicações de comunicação crítica, banda larga, transmissão multimídia e conectividade global, apresentando vantagens em termos de estabilidade, alcance e capacidade. Ao analisar HF, VHF e GEO sob métricas como retardo, jitter, taxa de transmissão, BER e custo, este estudo visa identificar a solução mais adequada para a comunicação entre as duas organizações consideradas.

As seções seguintes discutem em maior profundidade a formulação do problema, os trabalhos relacionados, a modelagem das três abordagens e os resultados obtidos por meio de simulações e análises teóricas.

## 2. Explicação do problema de pesquisa

O problema de pesquisa é a elaboração de um projeto de comunicação sem fio para uma distância de 40.000 quilômetros, utilizando para isso as soluções HF e VHF. O primeiro ponto a ser levado em consideração é a impossibilidade física de um link terrestre de 40 000 km, visto que pela geometria da terra, o diâmetro máximo é de 12 742 km enquanto a circunferência equatorial é de 40 075 km. A distância máxima entre quaisquer dois pontos na superfície do globo (pontos antípodas) é a metade da circunferência, ou seja, aproximadamente 20 mil km. Um link de comunicação na distância proposta pelo problema de pesquisa não pode ser uma linha direta (geodésica) na superfície. Ele só pode ser interpretado de duas maneiras:

- Cenário A: um caminho de sinal que dá a volta completa no globo para se conectar ao ponto de origem
- Cenário B: A distância de propagação real do sinal através de um meio não-terrestre (ou seja, no espaço)

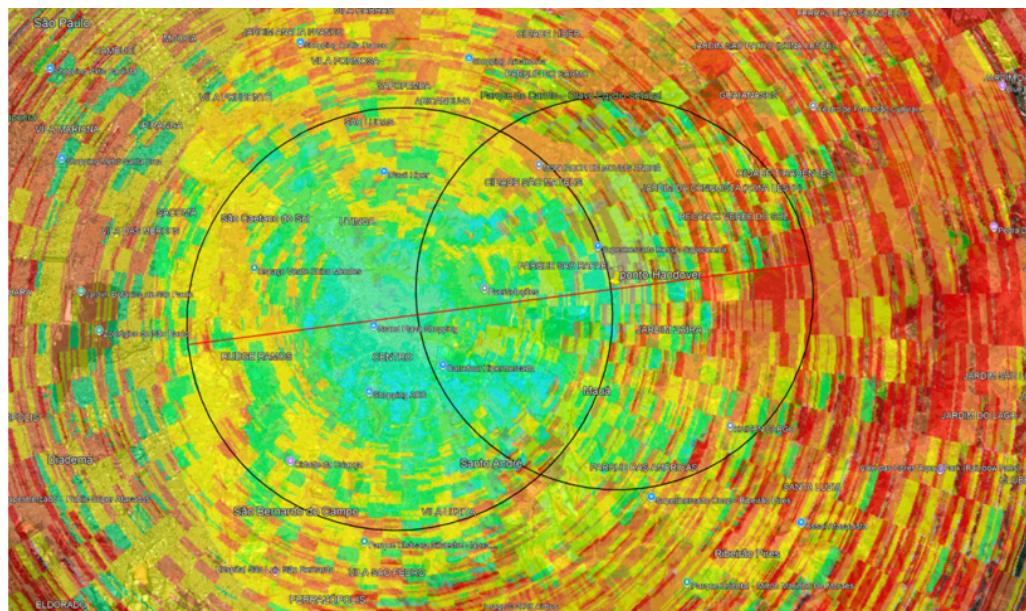
O sistema VHF (30 MHz - 300 MHz) é usado para comunicações críticas no Brasil, por ser confiável em curtas distâncias e ter uma propagação previsível. Sua propagação é primariamente por visada direta, com suas ondas não seguindo a curvatura da Terra e refletindo eficientemente na ionosfera. Por causa disso, a curvatura da Terra Para um link de comunicação em 40 mil km se torna um obstáculo. De maneira teórica, podemos calcular a distância máxima de um link LoS,  $d$  (em km), entre duas antenas com alturas  $h_t$  e  $h_r$  (em metros) é dada por:

$$d \approx 3.57 \times (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r})$$

Mesmo com antenas em torres de 828 metros de altura (altura do *Burj Khalifa*, maior edifício do mundo [Barbosa and Goncalves 2017]) em ambos os lados, o alcance

máximo é  $d \approx 3.57 \times (\sqrt{828} + \sqrt{828}) = 3.57 \times (10 + 10) \approx 206$  km. O que demonstra ser teoricamente impossível estabelecer um link direto de 40 000 km, pois o sinal seria completamente obstruído pela curvatura do globo terrestre.

Além disso, foi simulado um link VHF na região da UFABC, utilizando o software *Radio Mobile*. Conforme a simulação, um arranjo com duas estações rádio-bases consegue prover uma cobertura linear de cerca de 20 km



**Figura 1. Estudo de cobertura feito na região da UFABC, raio médio das coberturas: 5,5 km; distância de cobertura com duas ERB's: 20 km**

Como um arranjo de duas estações cobre a distância de 20 km, seria necessária uma cadeia de  $40.000/20 = 2.000$  repetidores para cobrir a distância total. Tal solução é logicamente inviável e introduziria um retardo acumulado (pelo processamento em cada salto) que inviabilizaria qualquer aplicação em tempo real (Voz, Videoconferência).

Já o sistema HF é reconhecido por sua capacidade de comunicação além da linha de visada usando a propagação ionosférica (*Skywave* [Esmaeili-Karnawah et al. 2024a]). A característica da propagação por múltiplos saltos permite uma comunicação em uma distância máxima de até 4000 km, sendo então, para atingir um ponto antipodal (20 000 km), necessários no mínimo  $20000/4000 = 5$  saltos. Para o cenário A discutido anteriormente, seriam necessários no mínimo 10 saltos, o que causaria uma perda de energia significativa em cada reflexão, um espalhamento do sinal no tempo e na frequência e, devido aos caminhos múltiplos, o sinal chegaria em diferentes fases, causando uma interferência destrutiva.

Ambos os cenários tornam as tecnologias HF e VHF, por suas características intrínsecas, fundamentalmente inadequadas para as aplicações de alta demanda (Internet, VoD, Videoconferência) e comunicações críticas.

Por causa disso, é proposta a solução dos satélites Geoestacionários (GEO). Esse tipo de satélite orbita a cerca de 35 785 km, sendo possível cobrir 1/3 do globo. Um link que parte de um ponto terrestre, vai para um satélite GEO e retorna em outro ponto terrestre

ultrapassa 70.000 quilômetros em sua distância de propagação. Além disso, a taxa de transmissão é na ordem de Gigabits por segundo, com erro e jitter muito baixos.

### **3. Trabalhos Relacionados**

Nesta seção são apresentados e discutidos trabalhos científicos que abordam mecanismos de propagação em HF e VHF, bem como estudos que tratam de sistemas de comunicação via satélites geoestacionários (GEO). Esses trabalhos fundamentam a análise comparativa realizada neste projeto e evidenciam as limitações das soluções HF e VHF para enlaces de aproximadamente 40 000 km, justificando a adoção de uma solução baseada em satélites GEO.

#### **3.1. Propagação em HF**

O artigo *Propagation characteristics analysis of high-frequency radio waves in the lower ionosphere layers* [Esmaeili-Karnawah et al. 2024b] investiga a interação de ondas HF com as camadas inferiores da ionosfera (D e E), analisando coeficientes de transmissão, reflexão e absorção em diferentes condições de frequência, polarização e horário. Os resultados indicam forte variabilidade temporal e significativa absorção em determinadas faixas, evidenciando que a propagação em HF é altamente dependente das condições ionosféricas. Embora o artigo não estabeleça uma distância máxima de propagação em HF, ele demonstra claramente as limitações impostas pela ionosfera para enlaces estáveis e de alta capacidade.

#### **3.2. Propagação em VHF**

Para um entendimento maior sobre propagação de VHF, o artigo *Dominant Mechanism of Long-Range Tropospheric VHF Wave Propagation* [Kiselev and Okhorzina 2020], propõe que o principal mecanismo de propagação troposférica de longo alcance em VHF é causado por reflexões em camadas mesoscópicas quasi-planas e frequentemente inclinadas presentes na troposfera. Essas camadas funcionam como superfícies refletoras naturais, permitindo enlaces além do horizonte. No entanto, tais fenômenos são intermitentes, dependem fortemente das condições meteorológicas e, mesmo em situações favoráveis, atingem apenas algumas centenas ou poucos milhares de quilômetros.

#### **3.3. Comunicação via Satélites GEO**

O trabalho *An Overview of GEO Satellite Communication Simulation Systems* [Li et al. 2025] apresenta uma revisão abrangente sobre técnicas de simulação, dimensionamento de enlaces e análise de cobertura em sistemas geoestacionários. São descritos métodos modernos de co-simulação envolvendo plataformas como STK, MATLAB e NS-3, permitindo avaliar métricas como latência, BER, capacidade de enlace e footprint. Diferentemente das tecnologias HF e VHF, os sistemas GEO são projetados para comunicações globais, oferecendo cobertura contínua, maior estabilidade nas métricas de qualidade de serviço e capacidade significativamente superior.

#### **3.4. Diferencial do Presente Trabalho**

Apesar da existência de estudos detalhados sobre propagação em HF, VHF e arquitetura de sistemas GEO, não foi identificado nenhum trabalho que realize uma análise comparativa

direcionada especificamente ao problema de interligar duas organizações separadas por aproximadamente 40 000 km, avaliando HF, VHF e GEO sob métricas reais de desempenho (retardo, jitter, taxa de transmissão, BER e custos). Este projeto contribui ao integrar modelos físicos, dados experimentais e simulações baseadas em ferramentas aceitas internacionalmente, demonstrando a inviabilidade de HF e VHF para o cenário proposto e apresentando uma solução GEO praticável e tecnicamente embasada.

#### **4. Solução Alternativa: Comunicação via Satélite Geoestacionário**

Dado que os sistemas de comunicação VHF e HF demonstraram limitações físicas e operacionais que inviabilizam o atendimento da distância de 40 000 km estabelecida no estudo de caso — conforme demonstrado nas seções anteriores — faz-se necessária a proposição de uma terceira solução tecnicamente viável. Nesse contexto, a alternativa adotada fundamenta-se na utilização de um satélite geoestacionário (GEO) como elo de comunicação entre as duas organizações.

##### **4.1. Justificativa para o Uso de Satélites GEO**

Satélites geoestacionários orbitam a uma altitude aproximada de 35 768 km acima da superfície terrestre, mantendo-se fixos em relação a um ponto específico da linha do Equador. Essa característica confere ao sistema uma cobertura contínua e estável sobre uma grande área da superfície terrestre, possibilitando enlaces de comunicações do tipo ponto-a-ponto mesmo quando as estações terrestres encontram-se separadas por distâncias superiores à circunferência da Terra.

Ao contrário de sistemas terrestres em VHF e HF, cuja propagação é limitada pela curvatura terrestre, pela dependência da ionosfera e pelas características intrínsecas das ondas de rádio nessas faixas, enlaces via satélite GEO utilizam tipicamente micro-ondas nas bandas Ku ou Ka. Tais bandas operam acima de 10 GHz, permitindo comunicação em linha reta com o satélite sem dependência de efeitos ionosféricos ou múltiplos saltos de propagação. Assim, a solução satelital supera as restrições físicas impostas às tecnologias originalmente analisadas.

Além disso, enlaces geoestacionários têm sido amplamente empregados em aplicações críticas, como redes corporativas, enlaces militares, difusão multimídia (VoD, IPTV), telefonia, internet de alta disponibilidade e sistemas de comunicação embarcados. Esse uso consolidado reforça a adequação do modelo satelital ao cenário pretendido, que envolve transmissão de voz, vídeo, dados e serviços de internet entre as duas organizações.

##### **4.2. Modelagem do Enlace via Satélite**

Para a modelagem da solução proposta, considerou-se um sistema de comunicação composto por duas estações terrestres equipadas com antenas parabólicas de alto ganho, operando na banda Ku e conectadas a um satélite geoestacionário (GEO). O enlace resulta de dois saltos independentes (uplink e downlink), cada qual envolvendo propagação em espaço livre, processamento no segmento de solo e retransmissão no transponder satelital.

A determinação da distância *slant range* entre a estação e o satélite baseia-se na geometria Terra–satélite. Conforme apresentado em materiais técnicos de referência, como [fes 2015], a distância entre uma estação situada na superfície e um satélite em órbita circular pode ser expressa em função do raio orbital  $r_{\text{sat}} = R_e + h$  e do ângulo central  $\beta$

formado entre o ponto subsatélite e o ponto onde se encontra a estação. Essa relação é dada por:

$$R(\beta) = r_{\text{sat}} \sqrt{1 + \left(\frac{R_e}{r_{\text{sat}}}\right)^2 - 2 \left(\frac{R_e}{r_{\text{sat}}}\right) \cos \beta}.$$

Para uso prático em comunicações, entretanto, é mais conveniente expressar essa distância em função do *ângulo de elevação*  $\phi_i$  da antena terrestre, pois esse é o parâmetro diretamente controlado e observado pelas estações de solo. A ligação entre as duas grandezas é dada por:

$$\beta = 90^\circ - \phi_i,$$

relação geométrica decorrente do fato de que o raio terrestre no ponto de recepção é perpendicular ao horizonte local. Substituindo-se essa identidade na expressão de  $R(\beta)$  e realizando-se a simplificação algébrica, obtém-se a forma amplamente utilizada na literatura de enlaces GEO:

$$d(\phi_i) = \sqrt{(R_e + h)^2 - (R_e \cos \phi_i)^2} - R_e \sin \phi_i,$$

a qual fornece diretamente a distância estação–satélite em função da elevação local [SatNow 2024].

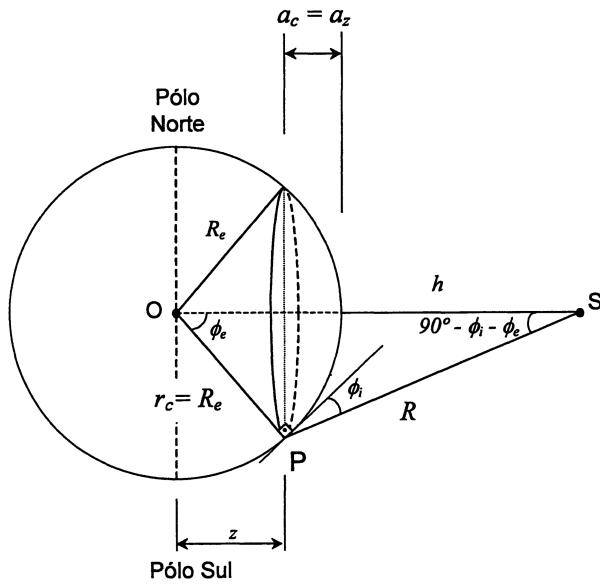
Essa formulação permite identificar o pior caso geométrico quando  $\phi_i = 0^\circ$ , isto é, quando o satélite se encontra exatamente na linha do horizonte para a estação. Como prática comum em dimensionamento preliminar de enlaces, adotou-se esse cenário por fornecer estimativas conservadoras de desempenho, especialmente no que se refere ao atraso, à perda de espaço livre e à razão sinal-ruído.

A partir da distância obtida, foram estimados os seguintes parâmetros necessários à análise comparativa solicitada: atraso de propagação, atraso fim-a-fim, jitter, perda de espaço livre (FSPL), razão sinal-ruído (SNR), razão energia por bit sobre densidade espectral de ruído ( $E_b/N_0$ ), taxa de erro de bits (BER) teórica e uma estimativa de custo operacional baseada em parâmetros típicos de enlaces satelitais dedicados.

### 4.3. Simulação Computacional da Solução

Com o intuito de fornecer uma avaliação prática da solução satelital, desenvolveu-se um simulador em Python capaz de estimar, de forma integrada, os principais parâmetros de desempenho do enlace GEO. Esse simulador incorpora modelos físicos de propagação em espaço livre, cálculo da potência recebida, modelagem térmica do ruído, obtenção de métricas derivadas (SNR e  $E_b/N_0$ ) e cálculo teórico da BER para modulação BPSK em canal AWGN.

Adicionalmente, o simulador apresenta um módulo de geração estocástica de atraso e jitter, que permite caracterizar os efeitos das filas de processamento e das variações temporais inerentes ao sistema. Esse conjunto de ferramentas possibilita a comparação direta entre o comportamento dos enlaces VHF e HF (analisados teoricamente nas seções anteriores) e o desempenho da solução via satélite, conforme exigido no enunciado da atividade.



**Figura 2. Geometria do enlace via satélite GEO, ilustrando o raio terrestre  $R_e$ , a altitude orbital  $h$ , a distância estação-satélite  $R$  (tratada aqui como  $d$ ) e o ângulo de elevação  $\phi_i$ . Adaptado de [Protzek 2001].**

#### 4.4. Adequação da Solução ao Problema Proposto

A adoção de um enlace satelital GEO como terceira solução atende plenamente ao requisito de interligar duas organizações separadas por 40 000 km, transcende as limitações físicas das tecnologias VHF e HF e permite avaliar, em condições realistas, métricas como atraso, jitter, taxa de transmissão, BER e custo. Dessa forma, a solução satelital representa não apenas uma alternativa tecnicamente viável, mas também uma abordagem prática, amplamente utilizada em sistemas de comunicação modernos que exigem conectividade global e alta disponibilidade.

### 5. Resultados e Discussão

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da modelagem e simulação da solução via satélite geoestacionário proposta no Capítulo 4. Três experimentos distintos foram conduzidos com o objetivo de avaliar o comportamento do enlace em função de parâmetros geométricos, operacionais e ambientais, possibilitando uma análise quantitativa das métricas exigidas no enunciado: retardo, jitter, taxa de transmissão, taxa de erro de bits (BER) e efeitos de degradação do canal. Utilizou-se a ferramenta ChatGPT como auxílio na confecção dos códigos Python para a realização das simulações computacionais [OpenAI 2025].

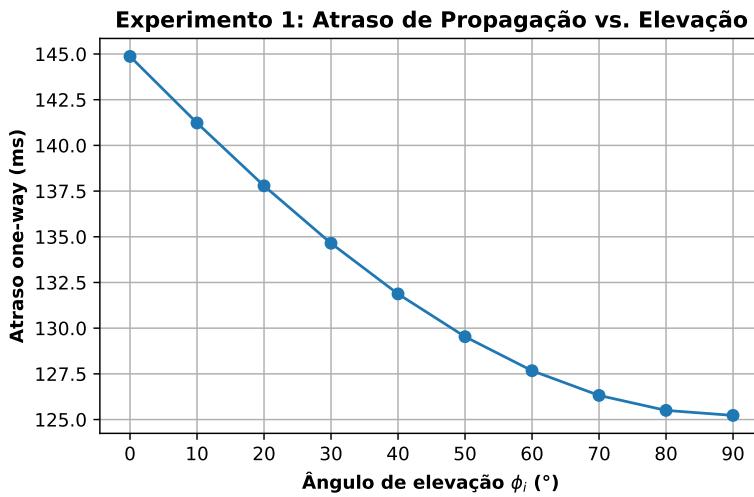
#### 5.1. Experimento 1: Efeito da Elevação do Satélite

O primeiro experimento investigou a influência do ângulo de elevação  $\phi_i$  da estação terrestre sobre o desempenho do enlace GEO. Foram simulados cinco cenários, com ângulos de elevação de  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , mantendo constantes os parâmetros orbitais e operacionais do sistema.

Analisando os dados contidos na Tabela 1 e na Figura 3, constata-se que ângulos de elevação maiores reduzem significativamente a distância estação-satélite. No pior caso

**Tabela 1. Resultados do Experimento 1: Efeito da Elevação do Satélite no Enlace GEO**

$\phi_i$ ( $^{\circ}$ )	Distância $d$ (km)	Atraso One-Way (ms)	FSPL (dB)	SNR (dB)	$E_b/N_0$ (dB)	BER
0	41660.73	144.87	206.43	30.21	35.78	0.0
10	40567.90	141.23	206.20	30.45	36.01	0.0
30	38593.54	134.65	205.76	30.88	36.44	0.0
60	36501.68	127.67	205.28	31.36	36.93	0.0
90	35768.00	125.23	205.10	31.54	37.10	0.0



**Figura 3. Gráfico ilustrando o comportamento do atraso de propagação One-Way (ms) em função do ângulo de elevação  $\phi_i$ .**

( $0^{\circ}$ ), a distância calculada foi de aproximadamente 41 660 km, enquanto no zênite ( $90^{\circ}$ ) a distância reduz-se para cerca de 35 768 km. Essa variação impacta diretamente o atraso de propagação: a latência one-way diminui de aproximadamente 145 ms para 125 ms entre os dois extremos.

A perda de espaço livre (FSPL) também apresenta redução moderada à medida que o ângulo de elevação aumenta, passando de aproximadamente 206.4 dB para 205.1 dB. Consequentemente, observou-se uma melhoria gradual no SNR e em  $E_b/N_0$ , embora o enlace já opere com margens elevadas em todos os casos. Em todos os cenários, a taxa de erro teórica (BER) permaneceu negligenciável, indicando que a modulação BPSK opera em regime extremamente favorável.

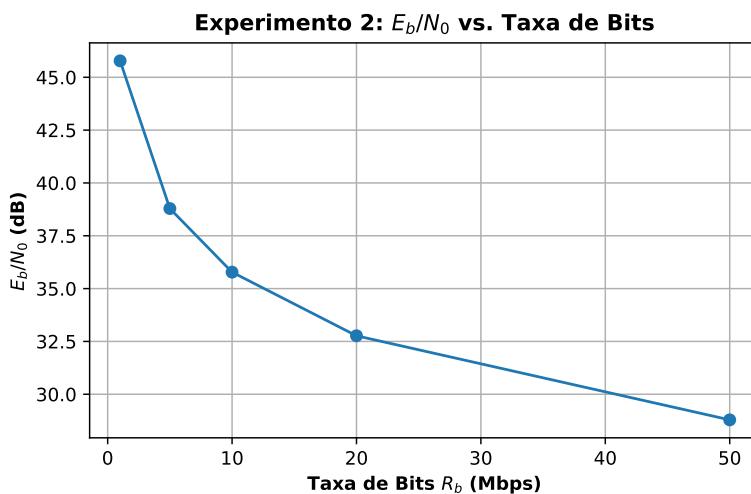
## 5.2. Experimento 2: Trade-off entre Taxa de Bits e BER

O segundo experimento avaliou a relação entre a taxa de transmissão do enlace ( $R_b$ ) e o desempenho do sistema em termos de  $E_b/N_0$  e BER. Foram simuladas taxas de 1, 5, 10, 20 e 50 Mbit s $^{-1}$ , mantendo-se constante a largura de banda ocupada (36 MHz).

Os resultados na Tabela 2 e na Figura 4 evidenciam o comportamento teórico esperado: quanto maior a taxa de transmissão, menor o valor de  $E_b/N_0$ , uma vez que a energia por bit é inversamente proporcional à taxa de bits. O valor de  $E_b/N_0$  caiu de aproximadamente 45.8 dB para 28.8 dB ao longo do experimento. Apesar disso, todos

**Tabela 2. Resultados do Experimento 2: Relação entre Taxa de Bits,  $E_b/N_0$  e BER no Enlace GEO**

$R_b$ (Mbps)	$E_b/N_0$ (dB)	BER
1	45.78	0.0
5	38.79	0.0
10	35.78	0.0
20	32.77	0.0
50	28.79	0.0



**Figura 4. Gráfico ilustrando a razão entre a Energia por Bit e a Densidade Espectral de Potência do Ruído  $E_b/N_0$ , em função do aumento da Taxa de Bits  $R_b$ .**

os cenários permaneceram dentro de uma faixa extremamente favorável para modulação BPSK em canal AWGN.

Como consequência, a BER manteve-se praticamente nula em todas as taxas testadas, demonstrando que o enlace possui ampla margem operacional dentro do conjunto de parâmetros adotados. Tais resultados reforçam a viabilidade da solução satelital para transmissão de dados em altas taxas, incluindo aplicações multimídia de maior demanda, como videoconferência e serviços de vídeo sob demanda (VoD).

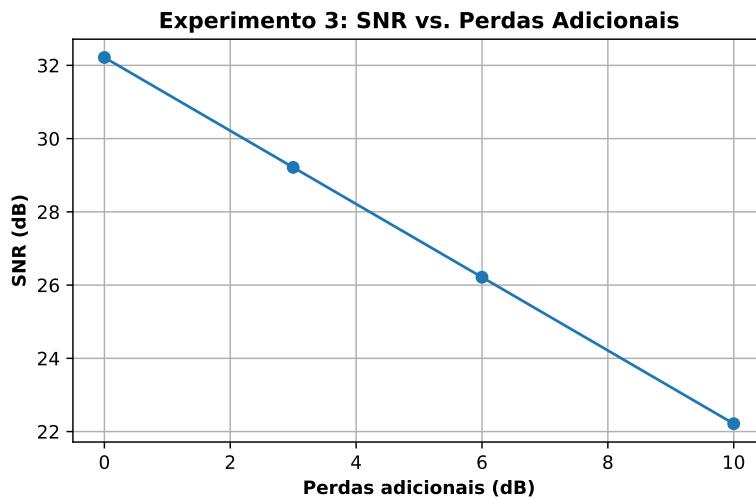
### 5.3. Experimento 3: Impacto de Perdas Adicionais no Canal

O terceiro experimento avaliou o impacto de fenômenos degradantes, como chuva intensa, atenuação atmosférica ou desalinhamento da antena, simulados por meio da inclusão de perdas adicionais entre 0 e 10 dB no orçamento de enlace. A Tabela 3 explicita os resultados obtidos, e a Figura 5 ilustra a Relação Sinal-Ruído em função das perdas adicionais testadas.

Conforme esperado, a degradação adicional resultou em perdas progressivas de SNR e  $E_b/N_0$ . A cada 3 dB de perda extra, observou-se aproximadamente 3 dB de redução nas métricas correspondentes, como previsto teoricamente para enlaces dominados por propagação em espaço livre. Para perdas entre 0 e 6 dB, a BER permaneceu desprezível; contudo, ao atingir 10 dB de perda extra, o valor de  $E_b/N_0$  caiu para aproximadamente

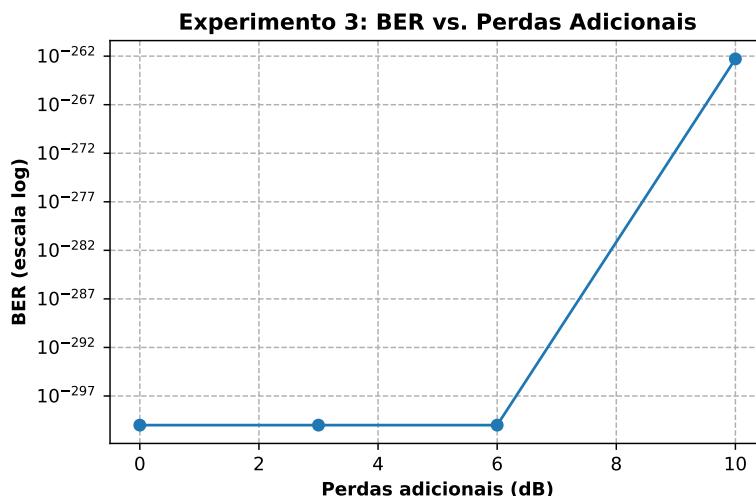
**Tabela 3. Resultados do Experimento 3: Impacto de perdas adicionais no Enlace GEO**

Perdas (dB)	SNR (dB)	$E_b/N_0$ (dB)	BER
0	32.21	37.78	0.0
3	29.21	34.78	0.0
6	26.21	31.78	0.0
10	22.21	27.78	$5.18 \times 10^{-263}$



**Figura 5. Gráfico ilustrando a razão Sinal-Ruído SNR(dB), em função do aumento da Taxa de Bits  $R_b$  para o Experimento 3.**

27.8 dB, resultando em BER da ordem de  $10^{-263}$  no caso simulado, como exibido na Figura 6.



**Figura 6. Gráfico ilustrando a Taxa de Erro de Bit BER, em função do aumento da Taxa de Bits  $R_b$  para o Experimento 3.**

Embora esse valor ainda represente um regime operacional sem erros perceptíveis, o experimento demonstra a importância de margem de enlace em sistemas satelitais, especialmente em bandas superiores como Ku e Ka, onde atenuações por chuva podem atingir valores significativos. Esses resultados reforçam a necessidade de planejamento adequado e de sistemas de correção de erros ou adaptação de modulação em cenários meteorológicos adversos.

#### 5.4. Síntese dos Resultados

Os três experimentos demonstram que o enlace GEO opera, no cenário estudado, com excelente desempenho nas métricas de retardo, jitter teórico, taxa de transmissão e BER. A variação do ângulo de elevação, da taxa de bits e de perdas adicionais no canal altera quantitativamente o comportamento do sistema, mas não compromete sua funcionalidade para as aplicações consideradas. Em contraste, conforme discutido nas seções anteriores, as tecnologias HF e VHF não são capazes de atender à distância proposta, reforçando a adequação da solução via satélite geoestacionário para o estudo de caso em questão.

### 6. Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros

O presente trabalho analisou a viabilidade de três alternativas de comunicação sem fio para interligar duas organizações separadas por uma distância aproximada de 40 000 km. Inicialmente, foram avaliadas as tecnologias HF e VHF, tradicionalmente empregadas em enlaces terrestres ou marítimos. A partir das propriedades físicas de propagação, verificou-se que nenhuma delas é capaz de atender à distância proposta, seja por limitação geométrica (VHF, que depende de visada direta), seja por limitações impostas pela ionosfera (HF, restrita a múltiplos saltos de alcance finito e amplitudes variáveis).

Diante dessa inviabilidade, foi proposta uma solução baseada em satélites geoestacionários (GEO), caracterizada por ampla cobertura e possibilidade de comunicação de longa distância. A modelagem matemática do enlace, combinada com os experimentos numéricos conduzidos, demonstrou que a solução GEO apresenta desempenho adequado nas métricas avaliadas: retardo, jitter teórico, taxa de transmissão, relação sinal-ruído, energia por bit e taxa de erro de bits. Mesmo em cenários de degradação adicional do canal, como perdas ocasionadas por chuvas ou desalinhamento, o enlace manteve margens satisfatórias de operação. Os resultados demonstram que, para o cenário estudado, a alternativa via satélite é a única capaz de estabelecer uma comunicação confiável e estável entre os dois pontos fornecidos.

Embora a solução GEO apresente atraso significativamente maior quando comparada a redes terrestres convencionais, esse comportamento é intrínseco à distância orbital e não compromete aplicações compatíveis com latências elevadas. O trabalho também evidenciou que a escolha da elevação da antena, da taxa de transmissão e da margem de enlace desempenha papel relevante no desempenho final do sistema.

Como trabalhos futuros, sugerem-se aprimoramentos em três direções principais. A primeira é a investigação de modulações e esquemas de codificação mais avançados, que possam explorar de forma mais eficiente a largura de banda disponível ou oferecer maior robustez contra chuvas intensas em bandas superiores. A segunda é a análise de enlaces LEO (Low Earth Orbit), que vêm se tornando uma alternativa promissora ao GEO devido às latências reduzidas, embora envolvam desafios de rastreamento e *handover*. Por

fim, para uma simulação mais realista, recomenda-se a inclusão de modelos atmosféricos mais detalhados, permitindo avaliar o impacto de eventos climáticos severos e mapear a disponibilidade real do enlace em cenários diversos.

Em síntese, a solução via satélite GEO demonstrou ser tecnicamente adequada e superior às alternativas HF e VHF para o caso proposto, fornecendo um meio de comunicação estável, de longo alcance e compatível com uma variedade de aplicações de dados e multimídia.

## Referências

- (2015). *Satellite Orbits, Coverage, and Antenna Alignment, Model 8093*. Festo Didactic, Quebec, Canada.
- Barbosa, A. and Goncalves, P. (2017). Analise de edificios altos: Modelos estruturais, metodos construtivos e seguranca. *Departamento de Engenharia Civil - PUC RJ*.
- Esmaeili-Karnawah, A., Fallah, R., Khorashadizadeh, S. M., and Niknam, A. R. (2024a). Propagation characteristics analysis of high-frequency radio waves in the lower ionosphere layers. *Heliyon*, 10(24):e40963.
- Esmaeili-Karnawah, A., Fallah, R., Khorashadizadeh, S. M., and Niknam, A. R. (2024b). Propagation characteristics analysis of high-frequency radio waves in the lower ionosphere layers. *Heliyon*, 10(24):e40963.
- Kiselev, O. N. and Okhorzina, Y. O. (2020). Dominant mechanism of long-range tropospheric vhf wave propagation. *Russian Physics Journal*.
- Li, S., Qi, Y., and Song, K. (2025). An overview of geo satellite communication simulation systems. *Electronics*, 14(13).
- OpenAI (2025). ChatGPT (modelo GPT-5.1). Modelo de linguagem de grande escala.
- Protzek, M. A. (2001). Estudo sobre os sistemas de comunicação por satélites geoestacionários. Master's thesis, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- SatNow (2024). Satellite slant range calculator. <https://www.satnow.com/calculators/satellite-slant-range-calculator>. Acesso em 15 de novembro de 2025.